

УДК 624.014+624.971

Применение динамических гасителей колебаний для повышения устойчивости башенных сооружений связи к ветровым воздействиям

Г. А. Богданова, Ж. В. Иванова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Богданова Г. А., Иванова Ж. В. Применение динамических гасителей колебаний для повышения устойчивости башенных сооружений связи к ветровым воздействиям // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 660–672. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-660-672

Аннотация

Цель: Исследовать вопросы в части применения динамических гасителей колебаний в конструкциях башенных сооружений связи для их защиты от воздействия ветровых нагрузок. **Методы:** Выполнить анализ конструктивных особенностей существующих башенных сооружений. Рассмотреть влияние различных факторов, включая и ветровую нагрузку, на выбор конструктивного решения башенных сооружений. Проанализировать климатические параметры района строительства и определить тип башенного сооружения в качестве объекта для проведения данного исследования. Определить критерии качества гашения вибрации, на основе которых осуществляется подбор конструкции динамического гасителя колебаний (ДГК), и провести расчет его массы. Провести расчетное исследование выбранного типа сооружения с учетом ветровых нагрузок и оценить эффективность предлагаемого решения динамического гасителя колебаний на повышение устойчивости башенных сооружений связи в районах с порывами ветра более 25 м/с. **Результаты:** Представлены результаты исследования конструкции динамического гасителя колебаний, направленных на улучшение условий эксплуатации объектов телекоммуникационной связи в районах с повышенной ветровой нагрузкой. **Практическая значимость:** Показано, что использование динамических гасителей колебаний в башенных сооружениях сотовой связи позволяет снизить амплитуду колебания и максимальные горизонтальные перемещения, возникающие в конструкции башни от воздействий ветра.

Ключевые слова: Конструкции, башенные сооружения, ветровые нагрузки, динамический гаситель, башни сотовой связи.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения зоны покрытия радиосигналами всей территории Российской Федерации. С одной стороны, это обусловлено необходимостью обеспечить потребность граждан своевременной и качественной телефонной и радиосвязью, а с другой стороны, в рамках проводимых реформ, затрагивающих такие сферы деятельности, как жилищно-коммунальные услуги, здравоохране-

ние, образование и др., уделить внимание созданию открытых информационных ресурсов и обеспечению доступа к ним граждан.

Таким образом, формирование единой информационной системы на всей территории РФ играет особую роль и способствует дальнейшему развитию сетевой инфраструктуры, что, в свою очередь, невозможно без возведения башенных сооружений связи.

Наличие различных климатических зон на территории РФ приводит к необходимости при проектировании башенных сооружений связи учитывать факторы, характерные для конкретного региона строительства (например, преобладание вечной мерзлоты, наличие сейсмической активности регионов, сочетание нескольких факторов и др.) [1]. Стоит также отметить, что наибольшая часть усилий и перемещений высотных сооружений возникает от действия ветровой нагрузки, которая зависит не только от скорости ветра и от размеров самого сооружения, но и от конструктивной формы, оцениваемой аэродинамическими коэффициентами.

Наиболее распространенными типами башенных сооружений связи, используемых для целей радио- или сотовой телефонной связи, являются решетчатые трех- или четырехгранные конструкции. Это способствует, с одной стороны, как облегчению конструкций, так и снятию ограничений по высоте, но с другой стороны, приводит к уменьшению жесткости сооружения и, как следствие, делает его более восприимчивым к ветровым нагрузкам, что приводит к возникновению колебаний в конструкции или даже ее опрокидыванию [2–8]. Стоит отметить, что ветровые нагрузки являются вибрационными и оказывают пагубное влияние на усталостный ресурс конструкции в целом.

Однако, несмотря на то, что традиционно башни сотовой связи проектируются с учетом ветровой нагрузки, вопросы, направленные на повышение устойчивости башенных сооружений к их воздействиям по-прежнему остаются актуальными.

Одними из основных нагрузок, действующих на конструкции башенных сооружений, которые необходимо учитывать при проектировании, являются динамические воздействия природного характера, такие как сейсмические толчки и порывы ветра. Особенность динамических нагрузок является их изменчивость по времени (пери-

одические и непериодические). Наиболее распространенным видом периодической нагрузки является гармонический вид. Непериодические же нагрузки носят импульсивный характер большой интенсивностью однократного (удар, взрыв) или повторного (воздействие морских волн, порывы ветра, сейсмика) действия.

Стоит отметить, что механическая система обладает свойством накапливать энергию от периодического повторения динамических воздействий, что, в свою очередь, приводит к постепенному увеличению амплитуды колебаний и, как следствие, к разрушению от воздействия даже малой интенсивности из-за возникающего резонанса.

Поэтому для проектирования и дальнейшей эксплуатации телекоммуникационных сооружений необходимо снижать действие вибрационных нагрузок. Этого возможно достигнуть за счет изменения геометрических параметров сооружений, придания их архитектурным формам более обтекаемых очертаний, а также использования дополнительных технических средств, заставляющих рассеивать энергию колебаний самими сооружениями. Одним из наиболее рациональных способов снижения колебаний башенных сооружений является применение динамических гасителей колебаний (ДГК) [9, 10], которые по своей конструкции бывают следующих типов:

- гасители с гибким элементом (пружинные);
- маятниковые;
- комбинированные гасители, использующие внутреннее трение в элементе (вязкие демпферы).

В данной статье приводятся результаты исследования башенного сооружения связи, возводимого в районах с повышенной ветровой нагрузкой.

Для проведения исследований, учитывая разнообразный характер внешних воздействий различных климатических зон территории Российской Федерации, был выбран г. Ставрополь (V ветровой район [11], сейсмичность площадки строительства — 7 баллов [12]). Наибольшая

среднемесячная скорость ветра в Ставрополе составляет 5,6 м/с. Наибольшую опасность как для высотных зданий, так и для башен связи представляют порывы ветра, превышающие 25 м/с, что может вызвать повреждения и увеличение нагрузки на рассматриваемые объекты. Для Ставропольского края вероятность возникновения таких ветров составляет примерно 58%, или один раз в полтора года.

Объект исследования представляет собой четырехгранную башенную конструкцию, выполненную из одиночных уголков, соединяемых на болтах, высотой 50 м (рис. 1). Внутри башни для подъема обслуживающего персонала на нее по всей высоте предусмотрена лестница-стремянка с площадками отдыха.

Расчетное исследование включало в себя несколько этапов.

На первом этапе проводился выбор типа и характеристик динамического гасителя колебаний (ДГК), предназначенного для защиты башенного сооружения от воздействий ветра.

В качестве системы, обеспечивающей гашение колебаний, предложено использовать ДГК пружинного типа. Составные элементы ДГК представлены на рис. 2, 3:

– масса весом 1,7 т из бетона класса прочности В25;

– демпфер VD630/325-3 фирмы ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» со следующими характерными размерами: H — 556 мм; A — 646 мм; B — 542 мм; d — 60 мм; s — 35 мм;

– технические характеристики: вес — 535 кг; номинальная нагрузка: 60 000 Н (горизонталь) и 42 000 Н (вертикаль); допускаемые перемещения из номинального положения: горизонталь $\pm a$.

Расчет массы гасителя колебаний для рассматриваемого башенного сооружения выполнялся с использованием расчетно-вычислительного комплекса Mathcad 15 с принятой массой сооружения $m_0 = 17$ т и периодом колебаний башенного сооружения $T_0 = 0,475$ м/с.

Исходя из анализа полученных результатов, для проведения дальнейших расчетных исследований был принят ДГК массой 1,7 т, что составляет 10 % от общей массы рассматриваемого сооружения. Применение данного гасителя позволяет снизить максимальную амплитуду колебаний примерно в 2,5 раза, что способствует увеличению эксплуатационного срока телекоммуникационной башни.

На втором этапе выполнялось построение расчетной модели рассматриваемого сооружения с определением максимальных перемещений башни без гасителя и с ним.

Для проведения расчетов была построена модель башни в вычислительном комплексе SCAD Office 21.1 (рис. 4). Ветровая нагрузка моделировалась как распределенная по высоте нагрузка с учетом коэффициента $k = 1,2$ для типа местности В (городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м).

Ниже на рис. 5 представлены деформированная схема модели башни связи от горизонтальных перемещений (рис. 5, а) и наложение деформированной схемы от ветровых нагрузок на исходную модель башни связи (рис. 5, б) с отображением цветовой индикации величин перемещения в узлах.

На следующем этапе в рассматриваемую модель был введен динамический гаситель колебаний (рис. 6, 7).

Анализ полученных в ходе проведения расчетного исследования результатов представлен ниже в табличной форме.

Высотная отметка, м	Максимальное перемещение, мм (без ДГК)	Максимальное перемещение, мм (С ДГК)
20	13,3	5,1
40	65,1	23,2
50	111,2	37,7

Кроме максимальных перемещений были определены максимальные амплитуды колебаний в сооружении башни связи, которые составили

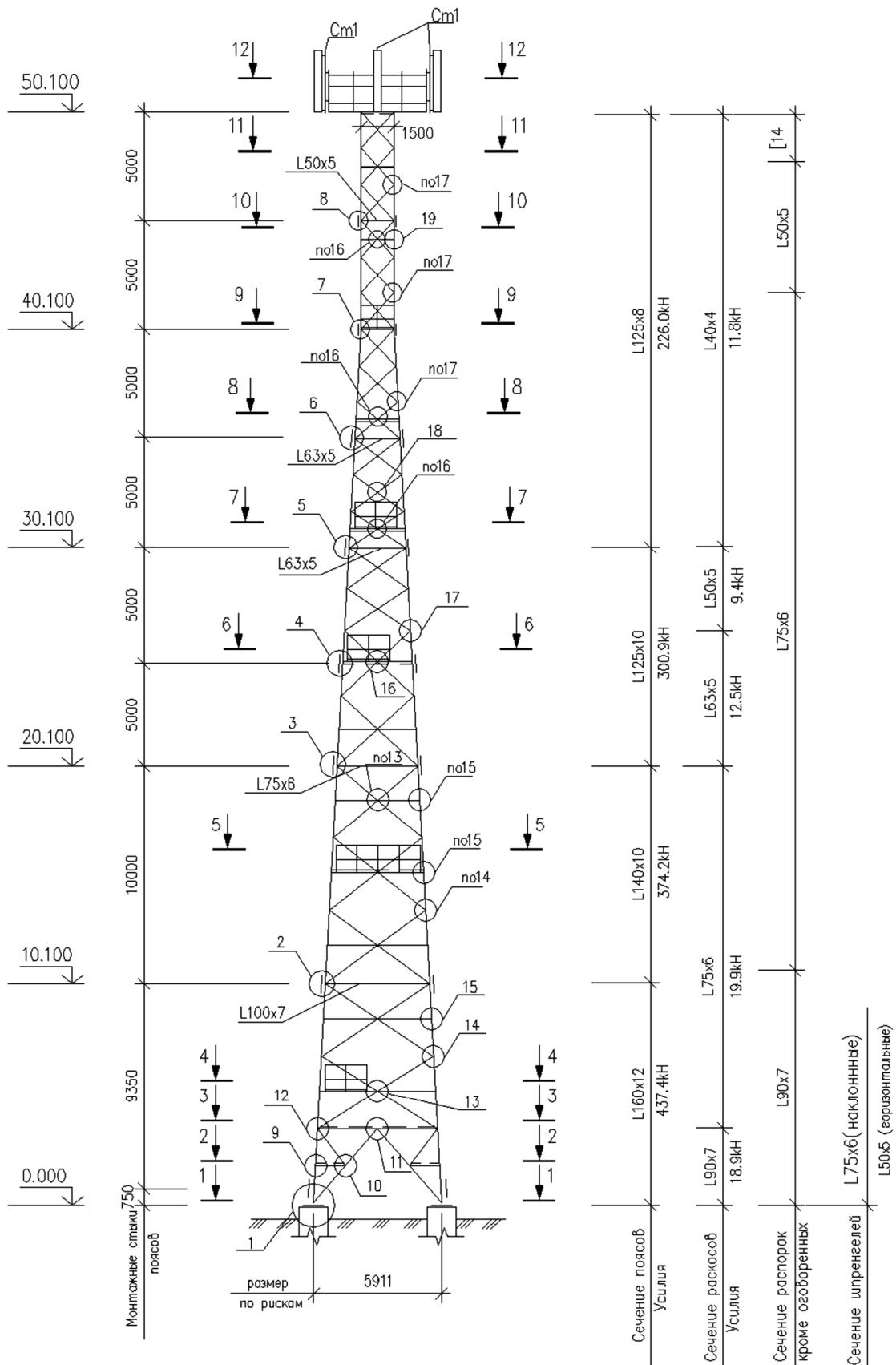


Рис. 1. Общий вид проектируемой башни

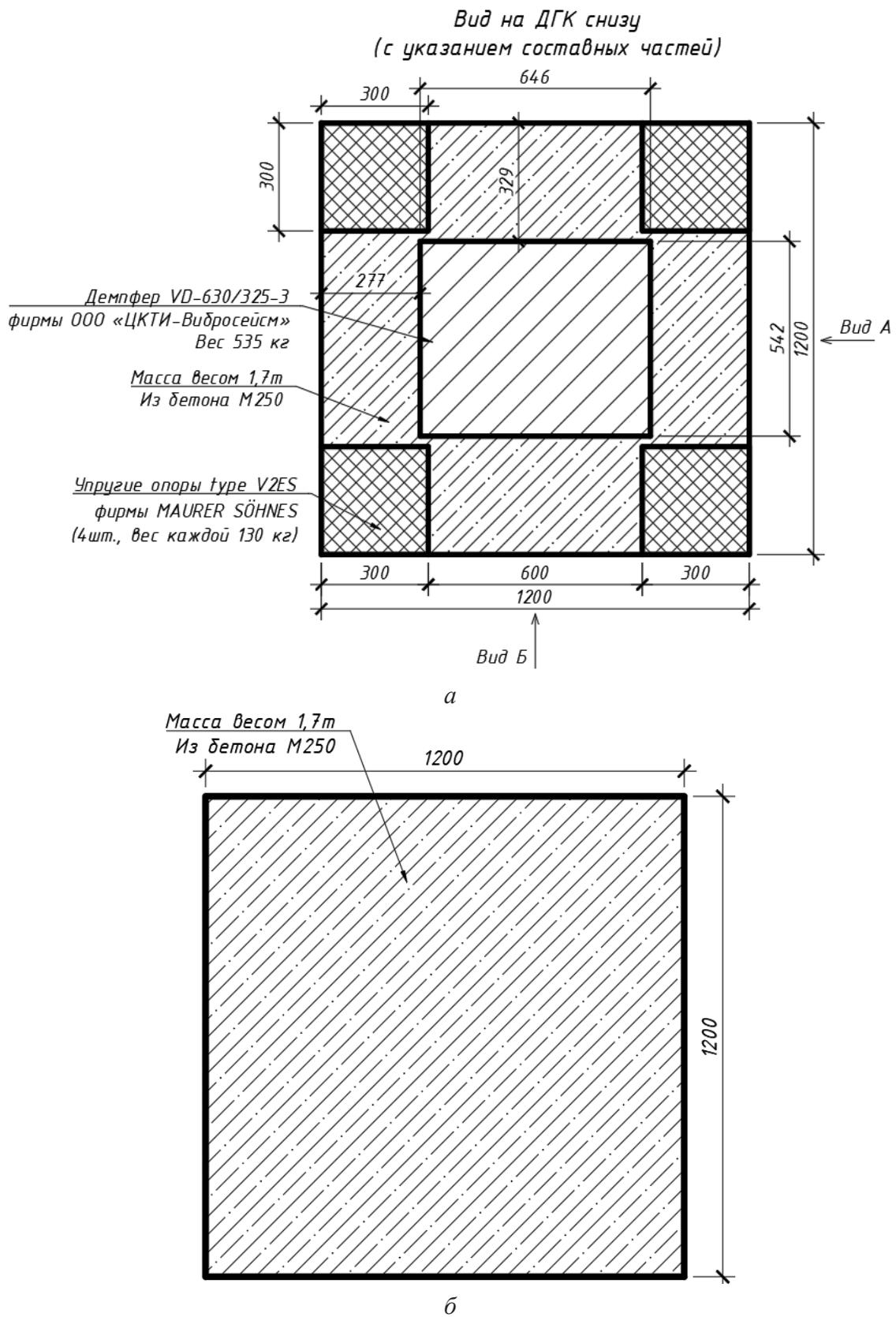


Рис. 2. Схема расположения элементов ДГК:
а — вид на ДГК снизу; б — вид на ДГК сверху

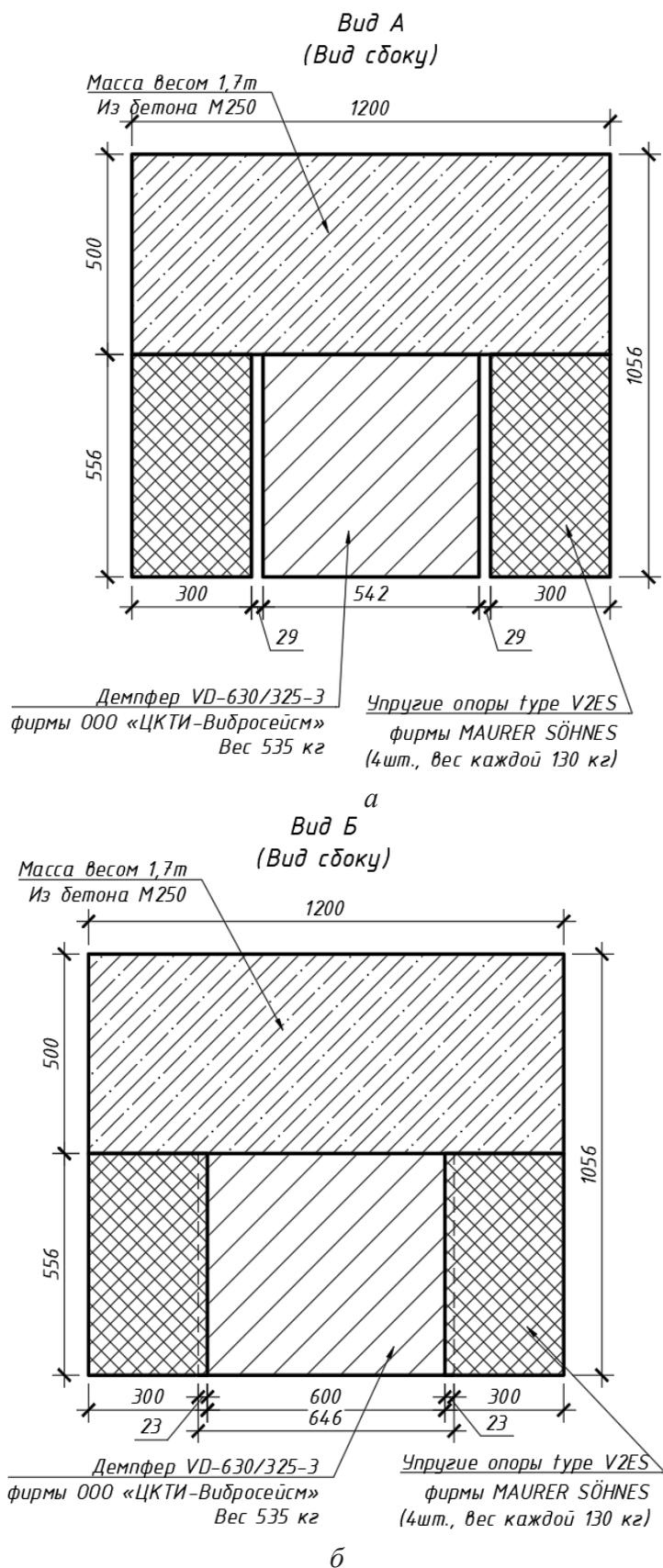


Рис. 3. Схема расположения элементов ДГК (вид на ДГК сбоку)

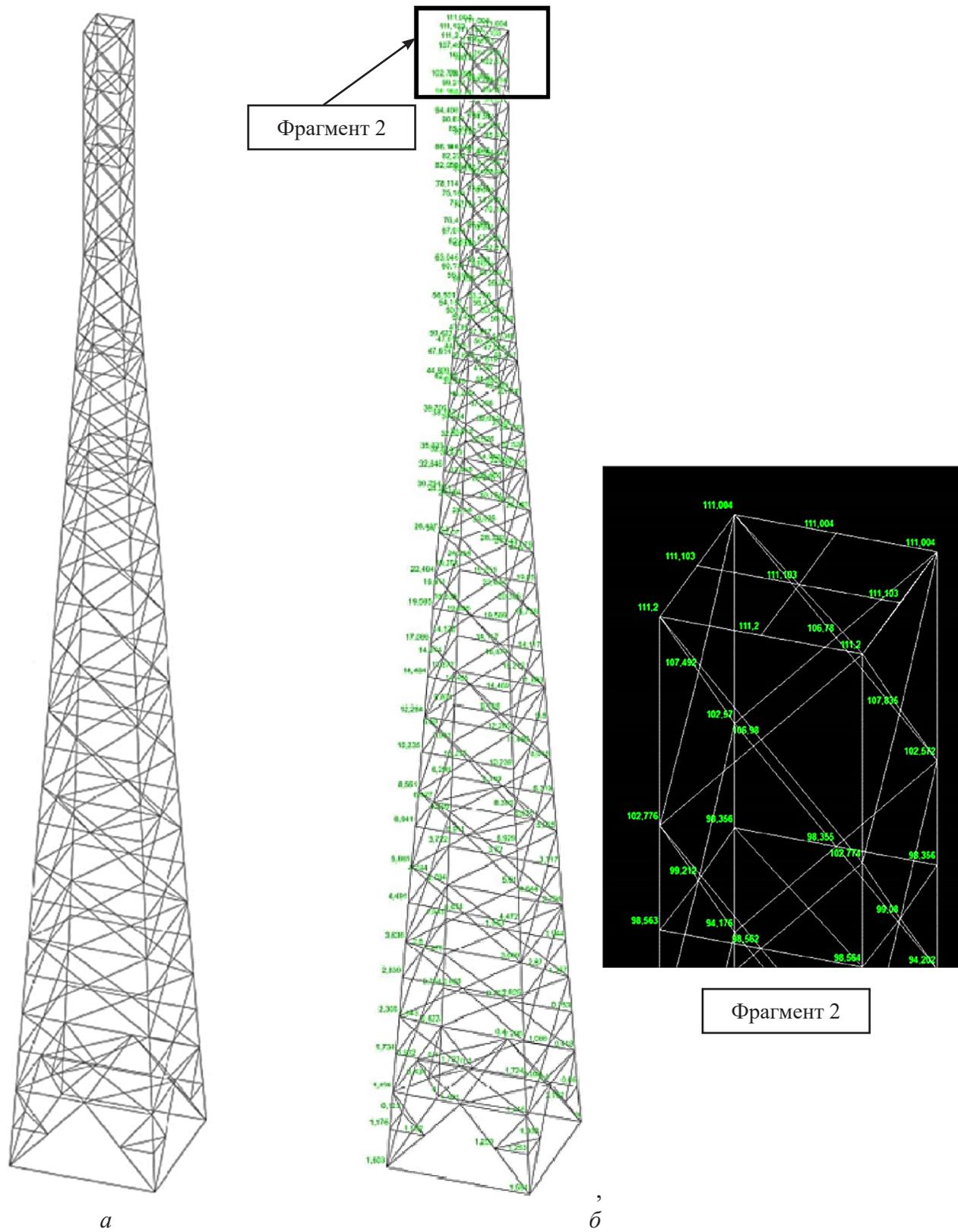


Рис. 4. Модель телекоммуникационной башни (а) и горизонтальные перемещения, образовавшиеся от приложенной ветровой нагрузки (б)

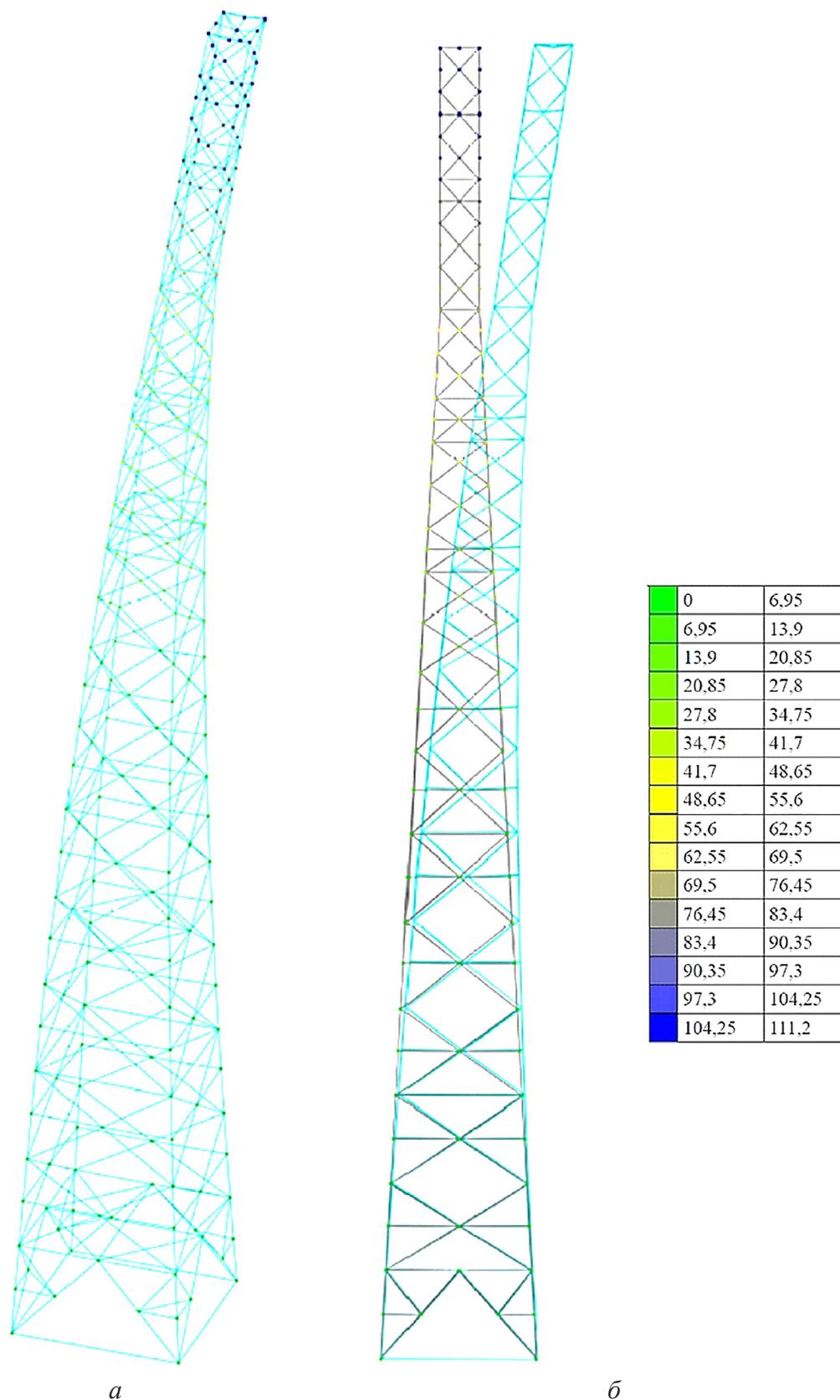


Рис. 5. Деформация башенного сооружения от действия ветровой нагрузки без установки ДКГ

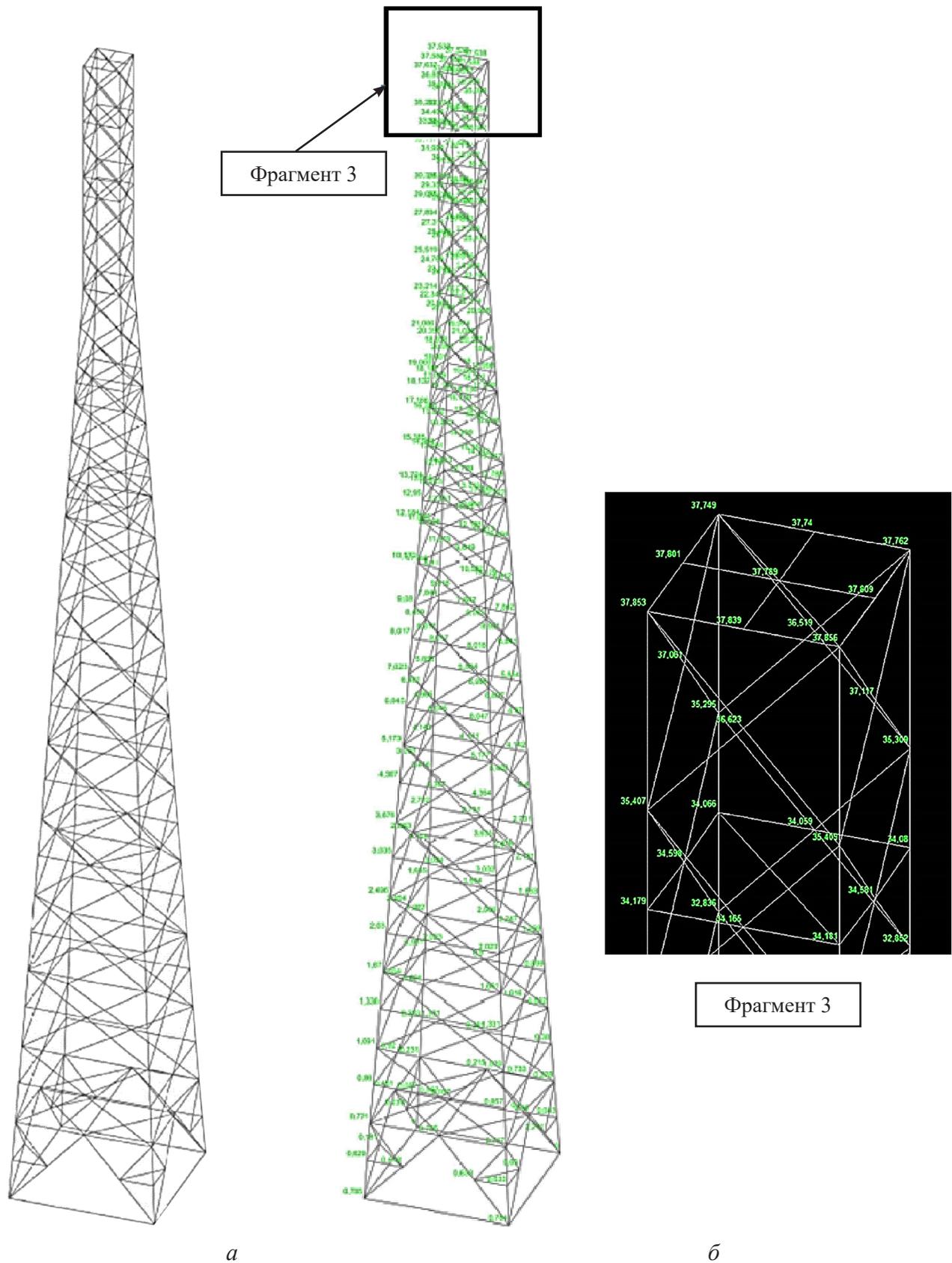
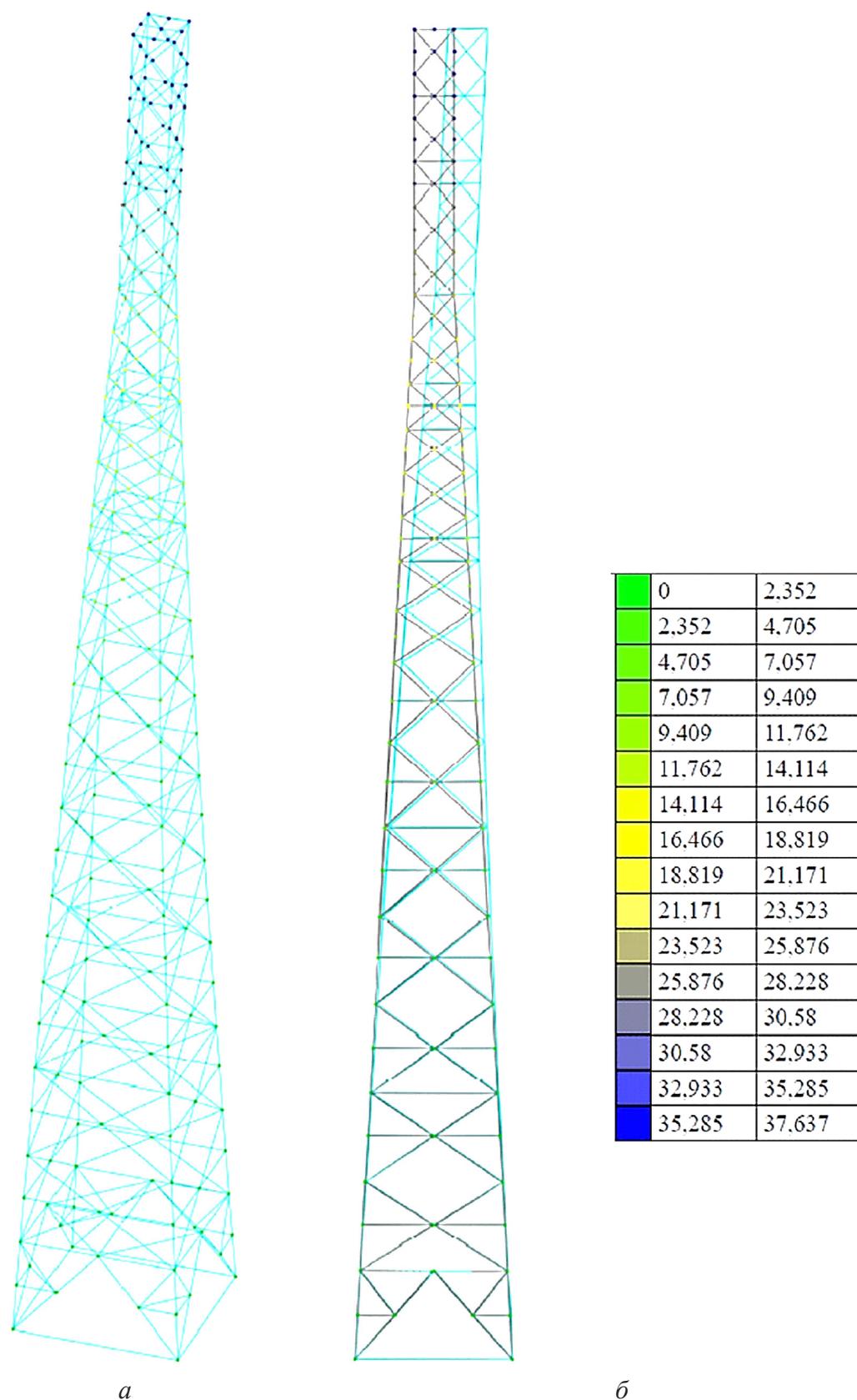


Рис. 6. Модель телекоммуникационной башни с динамическим гасителем (а) и горизонтальные перемещения, образовавшиеся от приложенной ветровой нагрузки (б)



а б
Рис. 7. Деформация башенного сооружения с динамическим гасителем от действия ветровой нагрузки

20 мм для башни без применения ДГК и 7 мм — для конструкции башни с использованием ДГК.

Оценка представленных результатов показывает, что применение ДГК в башне связи позволяет снизить амплитуду колебаний, возникающих в конструкции более чем в 2 раза, а максимальные горизонтальные перемещения от ветрового воздействия примерно в 3 раза.

Таким образом, доказано, что использование ДГК для повышения устойчивости башенных сооружений рассматриваемого типа способствует уменьшению интенсивности амплитуды колебаний, вызванных ветровыми воздействиями, а также снижению перемещений в конструкции, образующихся от ветровой нагрузки, и, как следствие, увеличению усталостного ресурса конструкции в целом.

Библиографический список

1. Иванова Ж. В. Влияние сложных природно-климатических условий на конструктивные решения зданий и сооружений различного назначения / Ж. В. Иванова // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. В 2 томах. Том 1, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГПС, 2021. — 237 с. — С. 140–143.
2. Барштейн М. Ф. Воздействие ветра на здания и сооружения / М. Ф. Барштейн // Нагрузки и надежность строительных конструкций: труды ЦНИИСК. — М.: Стройиздат, 1973. — Вып. 21. — С. 65–84.
3. Tanaka H. Effect of Tuned Mass Dampers on Wind Induced Response of Tall Buildings / H. Tanaka, C. Y. Mak // J. Wind Eng Ind Aerodyn. — 1983. — Iss. 14. — Pp. 357–368.
4. Сабитов Л. С. Конструкции башенных сооружений: специальность 05.23.01 — Строительные конструкции, здания и сооружения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л. С. Сабитов; Казанский государственный энергетический университет. — Ростов-на-Дону, 2021. — 38 с. — С. 29–38.
5. Бирбраер А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Родлер. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 594 с.
6. Brian W. Smith Communication structures / W. Brian. — London: Published by Thomas Telford Publishing, 2007. — 338 p.
7. Pavan Kumar M. Effect of wind speed on structural behaviour of monopole and self-support telecommunication towers / Kumar M. Pavan, P. Markandeya Raju, M. Navya et al. // Asian journal of civil engineering (BHRC). — 2017. — Vol. 18(6). — Pp. 911–927.
8. Benin A. V. Designing scenarios of damage accumulation / A. V. Benin, S. Nazarova, A. M. Uzdin // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2019. — Vol. 983. — Pp. 600–610. — DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_57.
9. Богданова Г. А. Методика оценки параметров реакции многоэтажных зданий с нелинейными динамическими гасителями колебаний при сейсмических воздействиях / Г. А. Богданова // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. В 2 т. Т. 1, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГПС, 2021. — 237 с. — С. 52–55.
10. Bogdanova G. Methodology for Assessing the Response Parameters of Multi-storey Buildings with Non-linear Dynamic Vibration Dampers in Case of Seismic Impacts / G. Bogdanova, A. Benin // Lecture Notes in Civil Engineering this link is disabled. — 2022. — Vol. 180. — Pp. 553–564. — DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_50.
11. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07—85 (с Изменениями № 1, 2, 3, 4). — Утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2022. — 102 с.
12. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7—81 (с Изменениями № 2, 3). — Утв. Приказом Минстроя России от 24.05.2018 № 309/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2022. — 100 с.

Дата поступления: 14.06.2023

Решение о публикации: 08.07.2023

Контактная информация:

БОГДАНОВА Галина Алексеевна — канд. техн. наук, доц.; galina_zdanya@mail.ru

ИВАНОВА Жанна Васильевна — канд. техн. наук, доц.; symava@mail.ru

The Use of Dynamic Vibration Dampers to Increase the Stability of Tower Communication Structures under Wind Loads

G. A. Bogdanova, Zh. V. Ivanova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Bogdanova G. A., Ivanova Zh. V. The Use of Dynamic Vibration Dampers to Increase the Stability of Tower Communication Structures under Wind Loads // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 660–672. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-660-672

Summary

Purpose: To investigate the application of dynamic vibration dampers in communication tower structures to protect them from the effects of wind loads. **Methods:** To analyze the design features of existing tower structures. To consider the effect of various factors including wind loads on the choice of tower structure design. To analyze the climatic parameters of the construction area and to determine the type of tower structure as the subject for conducting this research. To determine the quality criteria of vibration damping, on the basis of which the selection of design dynamic vibration dampener (DVD) construction is carried out, and to calculate its weight. To conduct the calculation study of the selected type of building with regard to wind loads and evaluate the effectiveness of the proposed solution of the dynamic vibration dampener to increase the stability of communication tower structures in areas with wind gusts over 25 m/s. **Results:** The results of the research of dynamic vibration dampener design aimed at improvement of operating conditions of telecommunication facilities in the areas with increased wind load are presented. **Practical significance:** It is shown that the use of dynamic vibration dampers in tower constructions of cellular communication makes it possible to reduce the vibration amplitude and the maximum horizontal displacements occurring in the tower structure under wind load.

Keywords: Structures, tower structures, wind loads, dynamic damper, cellular towers.

References

1. Ivanova Zh. V. *Vliyaniye slozhnykh prirodno-klimaticheskix usloviy na konstruktivnyye resheniya zdaniy i sooruzheniy razlichnogo naznacheniya. III Betankurovkiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov. V 2 tomakh. Tom 1, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda* [Influence of harsh natural and climatic conditions on the design of buildings and structures for various purposes. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings. In 2 volumes. Volume 1, St. Petersburg, December 2–3, 2021]. St. Petersburg: FGBOU VO PPS Publ., 2021, 237 p., pp. 140–143. (In Russian)
2. Barshtejn M. F. *Vozdejstvie vetra na zdaniya i sooruzheniya* [Impact of wind on buildings and constructions]. *Nagruzki i nadezhnost stroitelnykh konstrukcij Trudy CNIISK* [Loads and reliability of building structures: works of TsNIISK]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1973, Iss. 21, pp. 65–84. (In Russian)
3. Tanaka H., Mak C. Y. Effect of Tuned Mass Dampers on Wind Induced Response of Tall Buildings. *J. Wind Eng Ind Aerodyn*, 1983, Iss. 14, pp. 357–368.
4. Sabitov L. S. *Konstrukcii bashennykh sooruzheniy specialnost 05.23.01 — Stroitelnye konstrukcii zdaniya i sooruzheniya avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora texnicheskix nauk* [Tower structures: speciality 05.23.01 — Building structures, buildings and constructions: abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. Rostov-on-Don: Kazanskiy gosudarstvennyj energeticheskij universitet Publ., 2021, 38 p. (In Russian)
5. Birbraer A. N., Rodler A. Yu. *E'kstremalnye vozdejstviya na sooruzheniya* [Extreme impacts on structures]. St. Petersburg: Politexn. un-t Publ., 2009, 594 p. (In Russian)

6. Brian W. Smith *Communication structures*. London: Published by Thomas Telford Publishing, 2007, 338 p.
7. Pavan Kumar M., Markandeya Raju P., Navya M. et al. Effect of wind speed on structural behaviour of monopole and self-support telecommunication towers. *Asian journal of civil engineering (BHRC)*. 2017, vol. 18(6), pp. 911–927.
8. Benin A. V., Nazarova S., Uzdin A. M. Designing scenarios of damage accumulation. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 983, pp. 600–610. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_57.
9. Bogdanova G. A. *Metodika ocenki parametrov reakcii mnogoetazhnyx zdaniy s nelinejnymi dinamicheskimi gasitelyami kolebanij pri seismicheskix vozdeystviyax. III Betankurovkiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov. V 2 tomakh. Tom 1, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings. In 2 volumes. Volume 1, St. Petersburg, December 2–3, 2021* [Methodology for assessing the response parameters of multi-storey buildings with non-linear dynamic vibration dampers under seismic impacts]. St. Petersburg: FGBOU VO PSPS Publ., 2021, 237 p., pp. 52–55. (In Russian)
10. Bogdanova G., Benin A. Methodology for Assessing the Response Parameters of Multi-storey Buildings with Non-linear Dynamic Vibration Dampers in Case of Seismic Impacts. *Lecture Notes in Civil Engineering* this link is disabled, 2022, 180, pp. 553–564. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_50.
11. *SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.01.07—85 (s Izmeneniyami № 1, 2, 3, 4). Utv. Prikazom Ministroya Rossii ot 03.12.2016 № 891/pr* [SP 20.13330.2016. Loads and impacts. Updated edition of SNIp 2.01.07-85 (with Amendments № 1, 2, 3, 4). Approved. Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 03, 2016 № 891 / pr]. Moscow: FAU “FTsS” Publ., 2022, 102 p. (In Russian)
12. *SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II-7—81 (s Izmeneniyami № 2, 3). Utv. Prikazom Ministroya Rossii ot 24.05.2018 № 309/pr* [SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Updated version of SNIp II-7-81 (with Amendments No. 2, 3). Approved. Order of the Ministry of Construction of Russia dated May 24, 2018 № 309 / pr]. Moscow: FAU “FTsS” Publ., 2022, 100 p. (In Russian)

Received: June 14, 2023

Accepted: July 08, 2023

Author's information:

Galina A. BOGDANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; galina_zdanya@mail.ru

Zhanna V. IVANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; syrmava@mail.ru